

PENGARUH RADIUS SUDU KUARTAL TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS**Khairil Anwar, ST., MT., Muhammad Hasan Basri, ST., MT., Ibnu Rofiq**FAKULTAS TEKNIK JURUSAN TEKNIK MESIN
UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Palu – Sulawesi Tengah

Abstract: Effect of Quarter Turnout Radius on Savonius Wind Turbine Performance. This study aims to determine the effect of the addition of a quarter blade radius variation on the concave side of the main blade on the performance of the Savonius wind turbine. 3 savonius wind turbine models used in this study, each model has different variations such as model 1 turbine with the addition of quarter blade blades whose radius is 4.3 cm and 3.1 cm respectively, model 2 turbine with additional quarter blade variations the radius is 4.5 cm and 3.5 cm respectively, as well as the conventional type 3 turbine without the use of a quarter blade.

From the results of research conducted, it is known that variations in savonius wind turbines that produce the best performance are in model 1 turbines with the addition of quarter blade blades whose radii are 4.3 cm and 3.1 cm respectively with the resulting power coefficient reaching 0.201 on the TSR function 0.134 and the value of the resulting torque coefficient of 1,806 in the TSR function is 0.082. While in model 2 turbines with the addition of quarter blade blades whose radii are 4.5 cm and 3.5 cm respectively, the value of the generated power coefficient reaches 0.194 in the TSR function of 0.125 and the resulting torque coefficient value of 1,617 in the TSR function of 0.076, and in the model 3 turbine with the conventional type without using a quarter blade, the value of the generated power coefficient reaches 0.172 at the TSR function 0.119 and the resulting torque coefficient value of 1.548 at the TSR function 0.078.

Keywords: Savonius Wind Turbines, Quarter Blades, Radius, Power Coefficient, Torque Coefficient, Tip Speed Ratio

Abstrak: Pengaruh Radius Sudu Kuartal Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan variasi radius sudu kuartal pada sisi cekung sudu utamanya terhadap kinerja yang dihasilkan turbin angin savonius. 3 model turbin angin savonius yang digunakan pada penelitian ini yang masing-masing modelnya memiliki variasi yang berbeda-beda seperti turbin model 1 dengan penambahan variasi sudu kuartal yang radiusnya masing-masing 4.3 cm dan 3.1 cm, turbin model 2 dengan penambahan variasi sudu kuartal yang radiusnya masing-masing 4.5 cm dan 3.5 cm, serta turbin model 3 dengan tipe konvensional yang tanpa menggunakan sudu kuartal. Dari hasil penelitian yang dilakukan, diketahui bahwa variasi turbin angin savonius yang menghasilkan kinerja terbaik ada pada turbin model 1 dengan penambahan variasi sudu kuartal yang radiusnya masing-masing 4.3 cm dan 3.1 cm dengan nilai koefisien daya yang dihasilkan mencapai 0.201 pada fungsi *TSR* 0.134 dan nilai koefisien torsi yang dihasilkan sebesar 1.806 pada fungsi *TSR* 0.082. Sedangkan pada turbin model 2 dengan penambahan variasi sudu kuartal yang radiusnya masing-masing 4.5 cm dan 3.5 cm, nilai koefisien daya yang dihasilkan mencapai 0.194 pada fungsi *TSR* 0.125 dan nilai koefisien torsi yang dihasilkan sebesar 1.617 pada fungsi *TSR* 0.076, serta pada turbin model 3 dengan tipe konvensional yang tanpa menggunakan sudu kuartal, nilai koefisien daya yang dihasilkan mencapai 0.172 pada fungsi *TSR* 0.119 dan nilai koefisien torsi yang dihasilkan sebesar 1.548 pada fungsi *TSR* 0.078.

Kata kunci : Turbin Angin Savonius, Sudu Kuartal, Radius, Koefisien Daya, Koefisien Torsi, *Tip Speed Ratio*.

PENDAHULUAN

Turbin angin dapat dibagi berdasarkan dua kelompok yaitu turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind*

Turbine) dan turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*). Untuk turbin angin sumbu vertikal, cukup banyak model turbin yang sering digunakan baik pada

pengaplikasian langsung di lapangan maupun untuk penelitian, salah satunya yaitu turbin angin savonius. Banyak penelitian serta modifikasi yang telah dilakukan dengan menggunakan turbin ini, seperti penambahan aksesoris pada sudu turbin, jumlah sudu, model sudu, dan masih banyak yang lainnya. Akan tetapi tujuan utama di balik banyaknya pengembangan yang dilakukan pada turbin ini hampir semuanya sama yaitu untuk memperoleh rancangan turbin savonius dengan efisiensi yang lebih baik lagi. Alasan mengapa turbin angin savonius lebih disukai untuk banyak aplikasi pembangkit listrik seperti pembangkit listrik tenaga pasang surut, pembangkit listrik tenaga angin, serta pembangkit listrik tenaga air adalah karena turbin jenis ini dapat dibuat meskipun hanya dalam skala kecil, konstruksinya yang sederhana serta murah, juga perakitan dan perawatan yang mudah.

Hingga saat ini usaha untuk meningkatkan performansi dari turbin savonius terus dilakukan, seperti penambahan aksesoris pada sudu turbin berupa *fin* yang jarak dan jumlahnya divariasikan. Dari penambahan *fin* tersebut, diketahui bahwa semakin banyak *fin* yang terpasang akan memperkecil *drag* positif yang bekerja pada rotor turbin. Dengan menambahkan *fin* maka akan memperbesar luasan ruang dalam sudu dan juga memperbesar tekanan di sepanjang luasan sudu. Peningkatan gaya *drag* yang di akibatkan peningkatan tekanan dan luasan sudu turbin terjadi di kedua sisi sudu sehingga perbedaan tekanan yang dihasilkan dari kedua sudu semakin kecil ketika jumlah *fin* yang ditambahkan semakin banyak. Untuk itu penambahan 1 *fin* mampu menghasilkan gaya *drag* positif yang paling besar. (Hasan, Hantoro, & Nugroho, 2013).

Modifikasi turbin angin savonius untuk meningkatkan kinerja dengan mengkombinasikan sudu turbin berbentuk setengah lingkaran (model konvensional)

dengan sudu turbin model elips cekung. Dari percobaan dengan kombinasi tersebut diketahui dapat meningkatkan kinerja dari koefisien daya maksimum ($C_p \text{ max}$) hingga 11% dibandingkan dengan sudu model konvensional pada *tip speed ratio* (TSR) 0.79. (Sanusi, Soeparman, Wahyudi, & Yuliati, 2016).

Usaha untuk meningkatkan kinerja dari turbin angin savonius juga dilakukan dengan menambahkan aksesoris berupa pengarah yang diletakkan di depan sisi cekung sudu turbin, tujuannya untuk mencegah hembusan angin mengarah ke sisi cembung sudu turbin yang dapat menyebabkan nilai putaran turbin menjadi negatif. Dengan melakukan pengukuran secara eksperimental dan analisis numerik, juga membandingkan metode pengukuran dengan dan tanpa menggunakan pengarah. Hasil yang terbaik telah diperoleh dengan penggunaan pengarah pada sisi cekung sudu turbin yang dapat memberikan kinerja lebih baik dibandingkan tanpa penggunaan pengarah. Dengan menggunakan pengarah, fluida lebih terkonsentrasi ke bagian sisi cekung sudu dan mengurangi efek torsi yang dapat merugikan ketika fluida mengenai sisi cembung sudu turbin. (Altan & Atilgan, 2008).

Meskipun turbin angin savonius memiliki tingkat kinerja yang lebih rendah bila dibandingkan dengan turbin angin lainnya, namun dengan penambahan pengarah akan meningkatkan kecepatan angin melewati sudu turbin dan dengan demikian dapat meningkatkan efisiensi. Berkat pengaturan pengarah ini, aliran fluida yang melewati sisi cekung sudu akan menghasilkan torsi dan membentuk kekuatan baru di permukaan sisi cekung yang lain dari sudu turbin dan membuatnya berputar ke arah sebaliknya dari arah angin. Dengan cara seperti ini, kekuatan dan kinerja dari turbin angin savonius dapat mengalami peningkatan. (Altan & Atilgan, 2012).

Modifikasi berupa konfigurasi sudu turbin yang baru yang terdiri dari beberapa tambahan sudu kuartal (*quarter blade*) di sisi cekung sudu konvensional juga pernah dilakukan, sebuah metode penelitian berupa simulasi numerik pada turbin angin savonius untuk mensimulasikan dan memverifikasi efek dari penambahan sudu kuartal terhadap kinerja turbin angin savonius. Dari percobaan tersebut diketahui bahwa dengan konfigurasi sudu turbin baru yang ditambahkan pada sudu konvensional terbukti efektif meningkatkan nilai COP (*Coefficient of Performance*). Setelah dilakukan pengamatan, diketahui pula bahwa sudu dengan konfigurasi baru ini memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan sudu konvensional pada semua kasus kecepatan dengan nilai input yang berbeda, yaitu nilai COP pada kecepatan angin 8,23 m/s mengalami peningkatan sebesar 8,89%. (Sharma & Sharma, 2016).

Dari beberapa penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya, terutama pada penelitian yang disebutkan terakhir, hal inilah yang membuat penulis ingin menginvestigasi lebih lanjut penelitian turbin angin savonius dengan penambahan sudu kuartal pada sisi cekung sudu konvensional secara eksperimental dengan variasi jarak antar sudu atau radiusnya.

TINJAUAN PUSTAKA

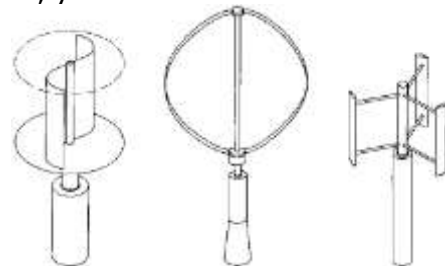
Turbin Angin

Turbin angin merupakan mesin dengan sudu berputar yang mengonversikan energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Jika energi mekanik digunakan langsung secara permesinan seperti pompa atau *grinding stones*, maka mesin (turbin) disebut *windmill*. Jika energi mekanik dikonversikan menjadi energi listrik, maka mesin disebut turbin angin atau kincir angin atau *wind energi converter* (WEC). Turbin angin sebagai mesin konversi energi dapat digolongkan berdasarkan prinsip

aerodinamik yang dimanfaatkan rotornya. Berdasarkan prinsip aerodinamik, turbin angin dibagi menjadi dua bagian yaitu jenis *drag* yang merupakan prinsip konversi energi yang memanfaatkan selisih koefisien *drag* dan jenis *lift* yaitu prinsip konversi energi yang memanfaatkan gaya *lift*. Jika dilihat dari arah sumbu rotasi rotor, turbin angin dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV).

Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal merupakan turbin angin yang sumbu rotasi rotornya tegak lurus terhadap permukaan tanah. Jika dilihat dari efisiensi turbin, turbin angin sumbu horizontal lebih efektif dalam mengekstrak energi angin dibanding dengan turbin angin sumbu vertikal. Keunggulan turbin angin sumbu vertikal tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah, tidak membutuhkan struktur menara yang besar, konstruksi turbin sederhana, dan turbin angin sumbu vertikal dapat didirikan dekat dengan permukaan tanah sehingga memungkinkan menempatkan komponen mekanik dan komponen elektronik yang mendukung beroperasinya turbin. Secara garis besar, terdapat dua model turbin angin sumbu vertikal, yaitu model darrieus dan savonius.



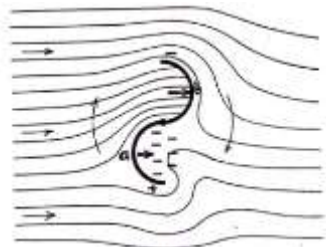
Gambar 1. Model turbin Savonius, Darrieus, H rotor (Hau, 2013)

Turbin angin Darrieus merupakan turbin angin yang menggunakan prinsip aerodinamik dengan memanfaatkan gaya *lift* pada penampang sudu rotornya dalam mengekstrak energi angin. Sedangkan turbin angin Savonius merupakan turbin angin sumbu vertikal yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder (atau

elips) yang dirangkai sehingga membentuk "S", satu sisi setengah silinder berbentuk cembung dan sisi lain berbentuk cekung yang dilalui angin. Dengan memanfaatkan gaya hambat, turbin angin savonius memiliki putaran dan daya yang rendah dibandingkan dengan turbin angin darrius. Meskipun demikian turbin savonius tidak memerlukan energi awal memulai rotor untuk berputar yang merupakan keunggulan turbin ini dibanding turbin darrius. Daya dan putaran yang dihasilkan turbin savonius relatif lebih rendah.

Turbin Angin Savonius

Rotor Savonius dikembangkan pertama kali oleh J. Savonius pada tahun 1920-an. Konsep awal savonius sendiri pertama kali dikembangkan oleh Flettner. Savonius banyak digunakan sebagai sebuah rotor, dimana bentuknya dibuat dari sebuah silinder yang dipotong pada sumbu bidang sentral menjadi dua bagian dan bagian tersebut disusun menyilang menyerupai huruf "S".



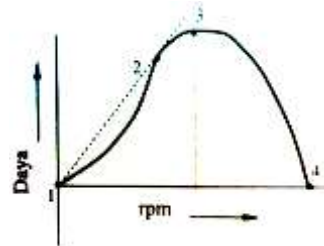
Gambar 2. Aliran fluida melewati profil S-Rotor (Savonius, 1925)

Seperti tampak pada gambar, Geometri dari rotor savonius memungkinkan aliran fluida mengalir tegak lurus terhadap bidang sudu bagian cembung dan bagian cekung. Dimana koefisien *drag* untuk aliran tegak lurus dengan bidang cembung sebesar 1.2, sementara koefisien *drag* untuk sisi cekung hampir sebesar dua kalinya yaitu 2.1. Karena gaya *drag* yang dihasilkan pada bagian cekung lebih besar, hal ini akan mempengaruhi torsi putaran savonius.

Daya, Torsi dan Putaran

Suatu rotor kincir angin dapat mengekstraksi daya dari angin karena rotor

tersebut menurunkan kecepatan angin tidak terlalu banyak maupun tidak terlalu sedikit. Suatu rotor yang diam, tidak menghasilkan daya sama sekali, demikian pula bila rotor tersebut berputar sangat cepat, udara diblok secara sempurna oleh rotor (rotor bersifat sebagai piringan pejal). Dalam hal ini tidak ada daya yang dihasilkan oleh kincir. Di antara kedua harga ekstrim ini terjadi putaran optimum dimana daya yang diekstraksi adalah maksimum. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 3. (Himran, 2005)



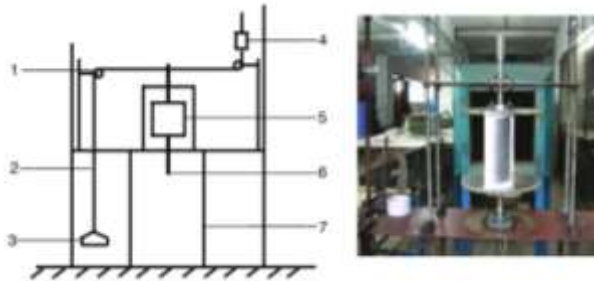
Gambar 3. Daya yang dihasilkan rotor sebagai fungsi putaran pada kecepatan angin tertentu

Pompa torak memberikan beban torsi konstan pada rotor kincir, maka untuk menentukan kurva torsi – putaran untuk rotor diperoleh dari Gambar 3. Hubungan daya P , torsi Q dan putaran ω , sesuai persamaan :

$$P = Q \times \omega \quad (W) \quad (2.1)$$

Dari hubungan ini diperoleh persamaan 2.1 Karena $Q = P/\omega$, maka torsi adalah sama dengan garis yang melalui titik awal dan salah satu titik pada kurva $P - \omega$. Tangens ini mempunyai harga terbesar bila garis menyinggung kurva tersebut. Oleh karena itu, nilai torsi maksimum dicapai pada putaran lebih rendah daripada putaran pada daya maksimum.

Rumus yang Digunakan dalam Pengujian



Gambar 4. Skema Pengujian (Kamoji, Kedare, & Prabhu, 2011)

Dari skema pengujian yang digunakan yang mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Kamoji (2011), maka rumus-rumus yang akan digunakan pada perhitungan juga mengacu pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yakni sebagai berikut :

- 1) Menghitung nilai bilangan reynold

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.2)$$

Dimana Re adalah bilangan reynold, ρ adalah densitas dari udara sekitar, V adalah kecepatan udara yang digunakan dalam pengujian, D adalah diameter rotor dan μ adalah viskositas udara.

- 2) Menghitung nilai *Tip Speed Ratio*

$$TSR = \frac{\omega D}{2V}$$

Dimana ω merupakan kecepatan sudut yang dihasilkan pada saat dilakukan pengujian.

- 3) Menghitung nilai torsi

$$T = \frac{(M - S)(r_{shaft} - r_{pope}) g}{1000}$$

Dimana M adalah beban yang bervariasi yang digunakan pada saat pengujian, S adalah beban yang terbaca pada alat ukur, r_{shaft} adalah jari-jari dari poros yang digunakan dan r_{pope} adalah jari-jari dari tali nilon.

- 4) Menghitung nilai koefisien torsi

$$C_t = \frac{4T}{\rho V^2 D^2 H}$$

- 5) Menghitung nilai koefisien daya

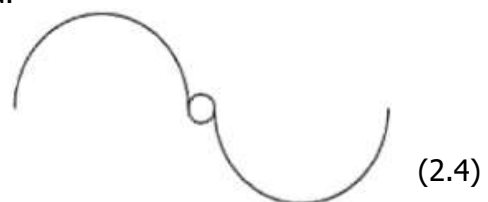
$$C_p = TSR \times C_t$$

Variasi Geometri Rotor Savonius Rotor Savonius dengan Dua Bucket

Berdasarkan prinsip aerodinamik, rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Koefisien hambat permukaan cekung lebih besar dari pada permukaan cembung. Oleh sebab itu, sisi permukaan cekung setengah silinder yang dilalui angin akan memberikan gaya hambat yang lebih besar daripada sisi lain sehingga rotor berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan potensi angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan angin yang melaluinya. Terdapat tiga variasi khusus bentuk rotor savonius dengan konfigurasi dua bucket, antara lain :

a) Konfigurasi tanpa overlap

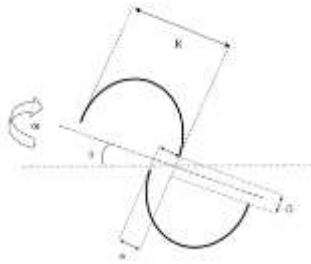
Konfigurasi rotor savonius pada gambar tidak memiliki jarak celah antara kedua bucketnya. Rotor ini memiliki kekuatan yang tinggi dikarenakan letak porosnya yang tepat berada di tengah kedua bucketnya. Rotor dengan konfigurasi seperti ini memiliki efisiensi yang paling rendah dibandingkan dengan konfigurasi lainnya.



Gambar 5. Savonius dua bucket tanpa overlap

b) Konfigurasi dengan overlap

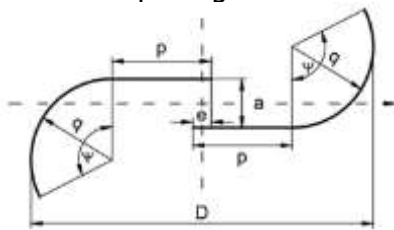
Konfigurasi rotor savonius pada gambar merupakan konfigurasi yang paling sering dijumpai. Jenis rotor ini memiliki celah antar bucket sehingga membuat arah angin yang dapat meningkatkan putaran dan dapat mengurangi getaran. Dengan konfigurasi *overlap*, rotor ini memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan rotor savonius tanpa *overlap*.



Gambar 6. Savonius dua bucket dengan *overlap* (Abbaszadeh & Doroodian, 2012)

c) *Konfigurasi dengan bucket didefleksikan*

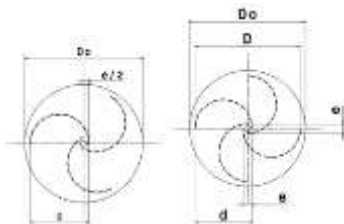
Rotor savonius tipe ini mempunyai bentuk seperti huruf "L". Rotor tersebut memiliki efisiensi yang lebih baik dibanding dengan rotor tipe pertama ataupun kedua. Tidak hanya keunggulan dalam membelokkan fluida, tetapi bucket seperti ini mampu bertindak seperti *airfoil* ketika fluida menabrak tepi rotor dan menimbulkan sedikit gaya *lift*. Dengan demikian mampu meningkatkan efisiensi. Tetapi tipe ini relatif sulit untuk dibuat karena membutuhkan lembaran logam yang di rol, bukan dari potongan drum atau pipa.



Gambar 7. Savonius dua bucket bentuk "L" dengan *overlap*/ tipe *batch* (Kacprzak, Liskiewicz, & Sobczak, 2013)

Rotor Savonius dengan Multi Bucket

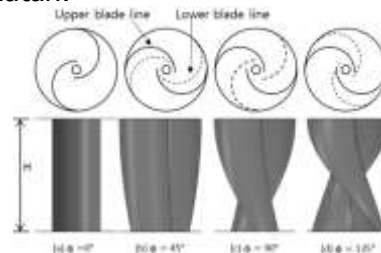
Rotor savonius dengan tiga bucket atau lebih, cenderung memiliki torsi awal yang baik daripada rotor savonius dengan dua bucket. Semakin banyak bucket yang digunakan, maka torsi awal yang dihasilkan akan semakin besar.



Gambar 8. Savonius tiga bucket dan empat bucket (Wenehenubun, Saputra, & Sutanto, 2015)

Rotor Savonius dengan Rotor Helix

Rotor ini memiliki desain yang tidak biasa, yaitu berbentuk heliks. Namun bentuk heliks disini memiliki keuntungan antara lain memiliki getaran yang halus karena variasi torsinya relatif merata untuk setiap bucket, dan juga memiliki torsi yang baik. Tetapi rotor tipe ini memiliki geometri yang relatif rumit, sehingga sulit dalam pembuatan.



Gambar 9. Model sudu *helix* dengan variasi sudut *twist* (Jae-Hoon, Young-Tae, & Lim, 2016)

Performansi Rotor Savonius

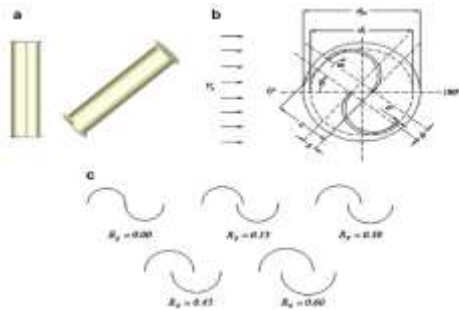
Beberapa peneliti telah banyak melakukan pengujian dan pengembangan untuk meningkatkan performansi rotor savonius. Ada beberapa parameter yang menentukan performansi dari rotor savonius, diantaranya adalah :

1. Rasio overlap (*overlap ratio*)
2. Aspek rasio (*aspect ratio*)
3. Jumlah bucket
4. Tingkatan bucket
5. Pengarah

Overlap Ratio

overlap ratio dari turbin savonius merupakan jarak *overlap* bucket dengan diameter turbin savonius. Dengan adanya *overlap* pada turbin savonius memungkinkan fluida yang memasuki sisi cekung pada suatu bucket dapat mengalir ke sisi cekung bucket yang lainnya dan dapat menghasilkan tambahan tekanan. Pada Gambar 10. rasio overlap di lambangkan dengan x dan koefisien power C_p . Hubungan antara rasio overlap dengan koefisien power turbin savonius telah diteliti oleh Akwa (2012), dengan diameter *end plate* sebesar 1,1 m, sedangkan diameter

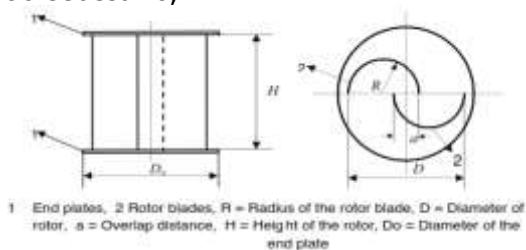
rotor 1 m. Tebal bucket 4 mm, jarak antar bucket rotor sama dengan nol dan *overlap ratio* R_s bervariasi antara 0; 0,15; 0,3; 0,45 dan 0,6. Diketahui bahwa pada bilangan *reynold* sebesar 432.000, dan bilangan *Reynold* 433500, diperoleh konfigurasi terbaik adalah R_s 0,15 yang memberikan koefisien daya 0,3161 untuk *tip speed ratio* 1,25.



Gambar 10. Savonius rotor (a) Model 3D (b) Geometri 2D dan (c) Variasi overlap (Akwa, Gilmar Alves da Silva, & Petry, 2012)

Aspect Ratio

Aspect ratio dari rotor savonius merupakan perbandingan antara tinggi dengan diameter rotor (H/D). Kamoji (2011) telah melakukan pengujian dengan variasi tinggi dari bucket dengan nilai *overlap* yang sama, yaitu nol dengan nilai *aspect ratio* 0,6; 0,7; 0,77; dan 1,0. Diperoleh *aspect ratio* 0,7 memiliki koefisien power paling besar yaitu sebesar 0,19 pada *tip speed ratio* sebesar 0,72.

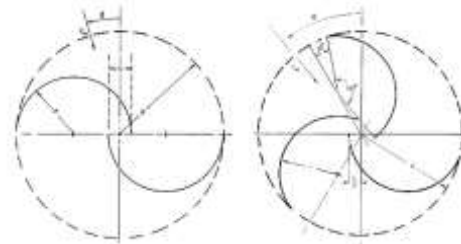


Gambar 11. Geometri rotor 2 bucket dengan *aspect ratio* adalah H/D (Kamoji, Kedare, & Prabhu, 2011)

Jumlah Bucket

Dalam penelitian yang dilakukan Blackwell (1977) diketahui pengaruh jumlah bucket terhadap koefisien daya sebagai fungsi dari *tip speed ratio*. Model diuji pada

overlap ratio, $s/d = 0,15$ pada bilangan *Reynold*, $Re = 8,64 \times 10^5$.

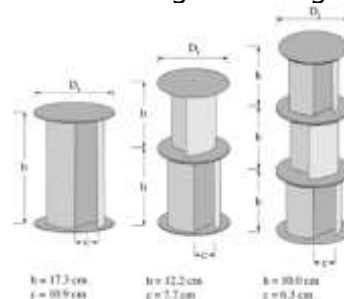


Gambar 12. Skema 2 buah bucket savonius rotor 180° dan 3 buah bucket 150° (Blackwell, Sheldahl, & Feltz, 1977)

Dari Gambar 12. menunjukkan bahwa konfigurasi rotor savonius dengan jumlah 2 bucket lebih unggul dibandingkan dengan rotor dengan jumlah 3 bucket. Namun rotor dengan jumlah 3 bucket memiliki torsi awal yang lebih baik.

Tingkatan Bucket

Sebuah pengujian *wind tunnel* dilakukan oleh Saha (2008), untuk melihat kinerja sistem savonius rotor satu, dua dan tiga tingkat. Konfigurasi dibuat sedemikian rupa sehingga ketiga model yang diuji, aspek rasio-nya sama. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kinerja terbaik diperoleh pada sudu 2 tingkat dengan nilai koefisien daya lebih baik jika dibandingkan dengan rotor satu tingkat dan tiga tingkat.

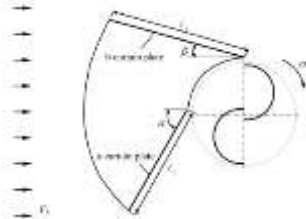


Gambar 13. Solid model dari sistem savonius rotor satu, dua, dan tiga tingkat (Saha, Thotla, & Maity, 2008)

Pengaruh

Kinerja savonius rotor dapat juga ditingkatkan dengan penggunaan pengarah angin sehingga arah aliran akan dibelokkan pada salah satu bagian sudu, dengan menggunakan jendela pengarah (*curtain*) yang didesain untuk meningkatkan kinerja dari savonius rotor yang rendah, yang

dilakukan secara eksperimental dan numerik. Hasil terbaik diperoleh dengan penambahan pengarah, di mana nilai *low static torque* didapat dengan pengarah yang pendek, sedangkan peningkatan nilai *static torque* meningkat seiring dengan penambahan *curtain* yang memiliki dimensi lebih panjang (Altan & Atilgan, 2012).

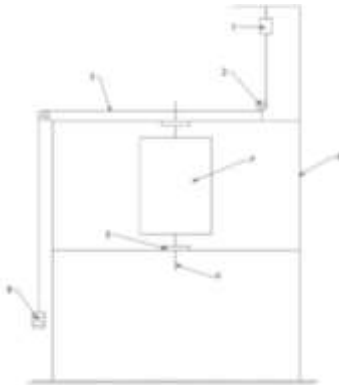


Gambar 14. Desain susunan pengarah yang ditempatkan didepan savonius rotor (Altan & Atilgan, 2012)

METODOLOGI PENELITIAN

Skema Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menggunakan hembusan udara buatan yang dihasilkan oleh *wind tunnel*, dan kecepatan udara yang diberikan akan di input berdasarkan variasi kecepatan udara yang akan digunakan yaitu 18.3, 21, dan 26.6 m/s.

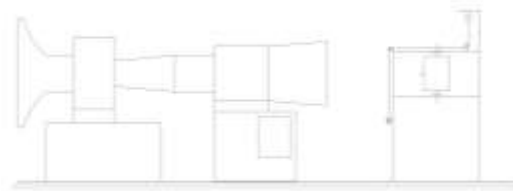


Gambar 15 Skema penempatan turbin angin savonius pada rangka serta komponen-komponen yang digunakan dalam pengujian

Keterangan gambar :

1. Timbangan digital
2. *Pulley*
3. Tali nilon
4. Poros
5. Bantalan
6. Rangka/dudukan turbin

7. Turbin angin savonius
8. Pemberat



Gambar 16 Skema pengujian pada *Wind Tunnel*



Gambar 17 Turbin yang telah terpasang pada rangka/dudukannya

Tahap Pengujian

Setelah tahap persiapan telah dilakukan dan terpenuhi, selanjutnya dilakukan tahap pengujian. Adapun langkah-langkah pada tahap pengujian yaitu :

1. Menjalankan *wind tunnel* dengan mengatur kecepatan udara pada panel yang terdapat pada komponen *wind tunnel*.

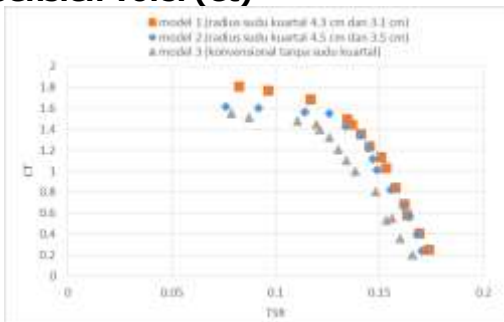


Gambar 18 Panel tempat mengatur kecepatan udara pada *wind tunnel*

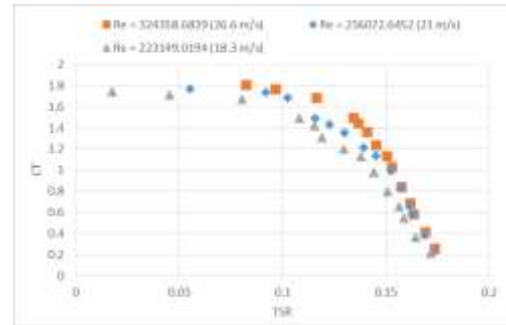
2. Menunggu beberapa saat hingga putaran rotor turbin terlihat stabil lalu lakukan pembacaan data dengan melihat alat ukur.
3. Setelah memperoleh data yang diinginkan, lanjutkan prosedur pengujian dengan menggunakan alat uji yang lain berupa turbin angin savonius yang telah divariasikan radius sudu kuartalnya dengan mengikuti langkah yang sama dari poin pertama.

PEMBAHASAN

Koefisien Torsi (Ct)



Gambar 19 Grafik perbandingan *Coefficient Torque* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada nilai bilangan Reynold 3.2×10^5



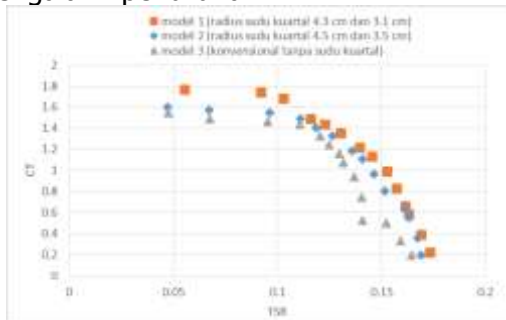
Gambar 20 Grafik perbandingan *Coefficient Torque* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin model 1

Dari Gambar 19 dapat dilihat bahwa pada turbin model 1 dengan variasi radius sudu kuartal 4.3 cm dan 3.1 cm memiliki nilai koefisien torsi tertinggi yaitu sebesar 1.806 pada fungsi *Tip Speed Ratio* 0.082. Sedangkan pada turbin model 2 dengan variasi radius sudu kuartal 4.5 cm dan 3.5 cm nilai koefisien torsi lebih rendah dari turbin model 1 yaitu sebesar 1.617 pada fungsi *Tip Speed Ratio* 0.076, sedikit lebih tinggi dari turbin model 3 tipe konvensional yang tanpa penambahan variasi sudu kuartal yang mempunyai nilai koefisien torsi sebesar 1.548 pada fungsi *Tip Speed Ratio* 0.078. Dapat diamati pula pada Gambar 20 yang merupakan grafik perbandingan perbedaan input kecepatan udara, pada grafik ini memperlihatkan bahwa kecepatan udara yang diberikan juga akan mempengaruhi nilai koefisien torsi yang dihasilkan oleh turbin.

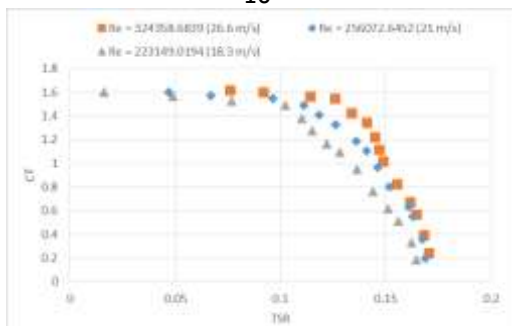
Pada Gambar 19 diatas diketahui juga bahwa terjadi peningkatan nilai koefisien torsi seiring dengan berkurangnya nilai *Tip Speed Ratio*. Pada penelitian ini torsi dapat dikatakan sebagai tenaga untuk menarik sesuatu, karena untuk mengetahui nilai torsi pada pengujian ini digunakan seutas tali nilon yang telah diberi beban pada salah satu ujungnya lalu tali tersebut dililitkan pada poros turbin angin yang berputar. Putaran poros turbin akan menanggung sebagian beban yang diberikan sehingga akan muncul selisih antara beban yang terukur pada timbangan digital dengan beban total yang diberikan

pada poros turbin, selisih inilah yang akhirnya mempengaruhi nilai dari koefisien torsi. Semakin besar beban yang diberikan, maka akan semakin besar selisih beban yang terbaca sehingga nilai koefisien torsi juga semakin tinggi.

Meskipun kecepatan udara yang diberikan tidak berubah, namun putaran per menit (rpm) yang dihasilkan poros turbin menjadi semakin kecil karena efek pembebanan yang diberikan semakin besar secara bertahap, hasilnya nilai *Tip Speed Ratio* yang diperoleh juga semakin kecil. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya peningkatan nilai koefisien torsi meskipun disaat yang sama nilai *Tip Speed Ratio* justru mengalami penurunan.



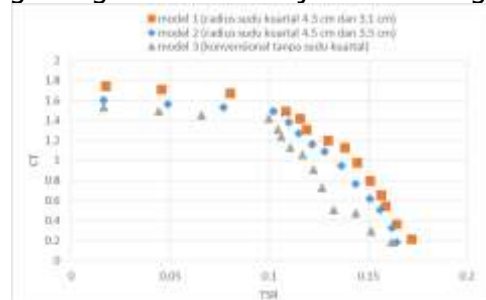
Gambar 21 Grafik perbandingan *Coefficient Torque* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada nilai bilangan reynold 2.5×10^5



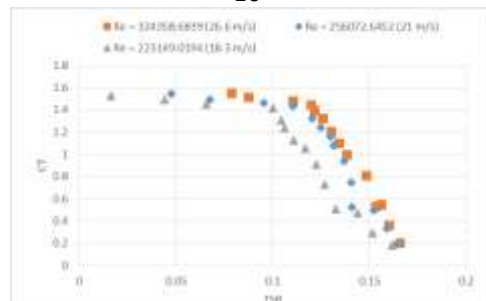
Gambar 22 Grafik perbandingan *Coefficient Torque* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin model 2

Dari penjelasan Gambar 19, dapat diketahui juga bahwa perubahan nilai koefisien torsi berbanding terbalik dengan perubahan nilai fungsi *Tip Speed Ratio*, karena semakin besar koefisien torsi yang dihasilkan justru *Tip Speed Ratio* yang diperoleh menjadi semakin kecil.

Meski pada kondisi kecepatan udara yang mengalami penurunan, pola yang dihasilkan pada grafik cenderung tidak berubah, hal ini dapat dilihat pada Gambar 20. Turbin model 1 dengan variasi radius sudu kuartal masing-masing 4.3 cm dan 3.1 cm tetap memiliki rata-rata nilai koefisien torsi yang lebih baik dibandingkan 2 model turbin yang lainnya. Meskipun mengalami sedikit penurunan nilai koefisien torsi pada turbin model 1 yang memiliki nilai sebesar 1.766 pada *Tip Speed Ratio* 0.055, hal ini dianggap wajar mengingat kecepatan udara yang diturunkan menyebabkan aliran udara yang mengenai rotor menjadi berkurang.



Gambar 23 Grafik perbandingan *Coefficient Torque* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada nilai bilangan reynold 2.2×10^5



Gambar 24 Grafik perbandingan *Coefficient Torque* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin model 3

Selain diameter rotor serta tinggi rotor, kecepatan udara juga merupakan salah satu faktor yang paling mempengaruhi nilai koefisien torsi yang dihasilkan turbin angin. Semakin berkurangnya aliran udara yang mengenai rotor mengakibatkan koefisien torsi maksimal yang dapat dihasilkan juga akan menjadi berkurang seperti yang diperlihatkan pada Gambar 22 dan 4.6.

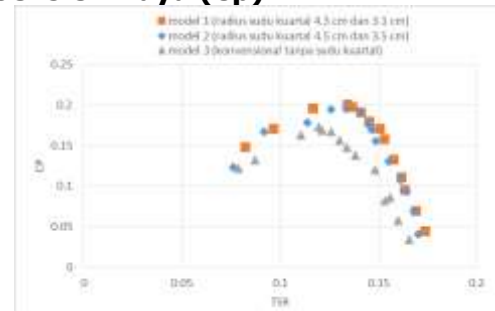
Pada input kecepatan udara yang paling rendah pada pengujian ini yaitu 18.3 m/s, dapat dilihat pada Gambar 23 nilai koefisien torsi yang paling rendah terjadi pada turbin model konvensional yang tanpa penggunaan radius sudu kuartal yaitu hanya sebesar 0.181 pada TSR 0.161, lalu sedikit mengalami peningkatan berturut-turut yang dimulai pada turbin model 2 dengan variasi radius sudu kuartal masing-masing 4.5 cm dan 3.5 cm yang mempunyai nilai koefisien torsi sebesar 0.181 pada fungsi TSR 0.164, hingga turbin model 1 dengan koefisien torsi senilai 0.218 pada fungsi $Tip Speed Ratio$ 0.171.

Dapat diamati pula bahwa pada Gambar 23, nilai koefisien torsi pada fungsi $Tip Speed Ratio$ semakin mendekati titik nilai TSR terendah (nilai TSR semakin mendekati nilai nol) seiring dengan peningkatan koefisien torsi yang terjadi. Ini dibuktikan dengan keadaan yang terjadi pada turbin model 1 dengan variasi radius sudu kuartal 4.3 cm dan 3.1 cm, meskipun nilai koefisien torsi sebesar 1.745 tetapi nilai fungsi TSR nya hanya senilai 0.017, begitupun pada turbin model 2 dengan variasi radius sudu kuartal 4.5 cm dan 3.5 cm serta turbin model 3 tipe konvensional yang tanpa penggunaan sudu kuartal, meskipun nilai koefisien torsi masing-masing berada pada nilai tertinggi pada input kecepatan udara di pengujian ini yaitu sebesar 1.599 dan 1.526, namun nilai fungsi TSR nya juga hanya berada pada nilai masing-masing 0.0162 dan 0.016. Hal tersebut dikarenakan pada kecepatan udara yang berangsur-angsur mulai menurun di tiap pengujiannya, poros turbin yang menanggung beban yang diberikan pada saat bersamaan kemampuan berputarnya juga sudah mulai mengalami penurunan.

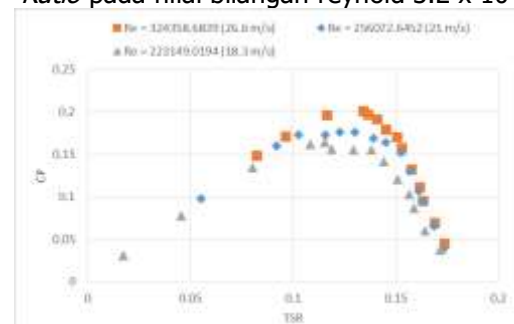
Hal ini memperlihatkan bahwa variasi model yang diberikan pada purwarupa turbin angin savonius mempengaruhi nilai-nilai yang akan

dihasilkan saat dilakukan pengujian secara eksperimental.

Koefisien Daya (C_p)



Gambar 25 Grafik perbandingan *Coefficient Power* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada nilai bilangan Reynold 3.2×10^5



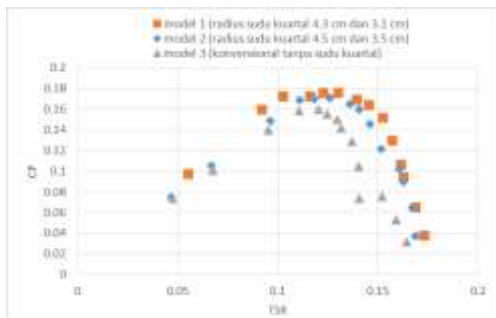
Gambar 26 Grafik perbandingan *Coefficient Power* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin model 1

Pada Gambar 25 dapat dilihat bahwa pola yang sama terjadi pada setiap variasi model turbin angin savonius, yaitu nilai *coefficient power* dari semua model mengalami kenaikan serta penurunan secara parabolik. Pada turbin model 1 yang memiliki variasi radius sudu kuartal masing-masing 4.3 cm dan 3.1 cm memiliki nilai koefisien daya yang paling tinggi yaitu mencapai 0.201 pada fungsi $Tip Speed Ratio$ 0.134, sedangkan nilai koefisien daya yang paling rendah ada pada turbin dengan tipe konvensional yang tanpa menggunakan sudu kuartal pada sisi cekung sudu utamanya yaitu 0.172 pada fungsi $Tip Speed Ratio$ 0.119.

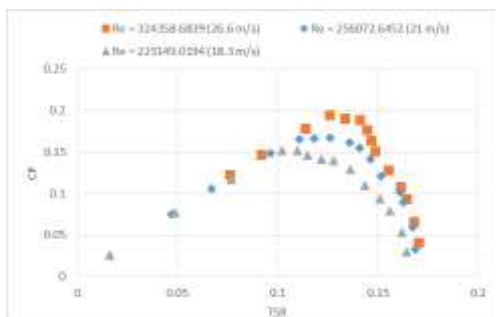
Nilai maksimum koefisien daya yang diperoleh hampir serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Sonu Sharma dan Rajesh Kumar Sharma (2016) yaitu untuk turbin angin savonius dengan tambahan variasi sudu kuartal pada sisi cekung sudu

utamanya, nilai *coefficient power* maksimum yang diperoleh ada pada kisaran 0.23 – 0.24.

Untuk turbin model 2 yang memiliki variasi radius sudu kuartal masing-masing 4.5 cm dan 3.5 cm, koefisien dayanya tidak lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin model 1 yaitu mempunyai selisih yang cukup dekat sebesar 0.194 pada fungsi *Tip Speed Ratio* 0.125. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan nilai bilangan reynold pada pengujian yang dilakukan juga akan menimbulkan perbedaan nilai koefisien daya yang dihasilkan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 26, sehingga dapat dikatakan tidak semua variasi model turbin dapat menunjukkan kinerja yang sama baiknya.



Gambar 27 Grafik perbandingan *Coefficient Power* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada nilai bilangan reynold 2.5×10^5



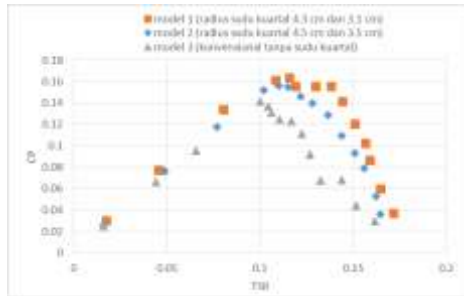
Gambar 28 Grafik perbandingan *Coefficient Power* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin model 2

Dengan kata lain meskipun kecepatan udara yang diterima oleh semua variasi model turbin angin savonius seragam, tetapi tidak semua variasi model turbin dapat mengkonversi daya yang dihasilkan oleh udara yang berhembus dari

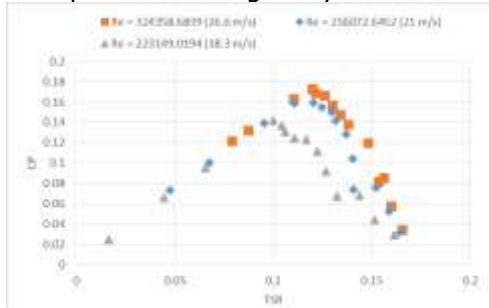
wind tunnel menjadi daya performansi yang dikeluarkan oleh turbin angin, hal ini dapat dilihat pada Gambar 28.

Pada Gambar 27 dapat diamati bahwa nilai koefisien daya maksimum yang dapat dicapai oleh keseluruhan model turbin sudah mulai mengalami penurunan jika dibandingkan dengan grafik yang ada pada Gambar 22. Pada turbin model 1 dengan variasi radius sudu kuartal 4.3 cm dan 3.1 cm, koefisien daya tertinggi yang dicapai oleh turbin sebesar 0.176 pada fungsi *TSR* 0.122. Sedangkan pada turbin model 2 dengan variasi radius sudu kuartal 4.5 cm dan 3.5 cm, koefisien daya tertinggi yang dapat dicapai sedikit lebih rendah, yaitu senilai 0.167 pada *TSR* 0.126. dan pada turbin model 3 tipe konvensional, nilai koefisien dayanya hanya sebesar 0.159 pada *TSR* 0.120.

Hal yang mempengaruhi tinggi rendahnya nilai koefisien daya yang dapat dihasilkan oleh turbin adalah koefisien torsi dan nilai fungsi *TSR*, karena nilai koefisien torsi yang dikalikan dengan nilai fungsi *Tip Speed Ratio* adalah cara untuk mendapatkan nilai koefisien daya pada sebuah turbin angin savonius. *Tip Speed Ratio* sendiri merupakan istilah lain dari perbandingan nilai kecepatan putar turbin angin savonius, khususnya kecepatan putar ujung rotor turbin angin terhadap kecepatan udara yang mengenai rotor turbin tersebut. Hal utama yang paling mempengaruhi nilai dari fungsi *Tip Speed Ratio* adalah putaran per menit (rpm) yang dihasilkan oleh poros yang ada pada turbin angin, karena semakin tinggi kecepatan putaran yang dihasilkan oleh poros turbin angin, maka nilai fungsi *TSR* yang dihasilkan pun semakin tinggi.



Gambar 29 Grafik perbandingan *Coefficient Power* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada nilai bilangan reynold 2.2×10^5



Gambar 30 Grafik perbandingan *Coefficient Power* turbin angin savonius terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin model 3

Berdasarkan perhitungan yang telah dibuat, diketahui bahwa pada setiap pengujian turbin angin savonius dengan kecepatan udara yang berbeda, nilai koefisien daya yang dihasilkan pun beragam. Seperti yang terlihat pada Gambar 30, semakin tinggi kecepatan udara yang digunakan pada saat pengujian maka nilai koefisien daya yang diperoleh juga semakin tinggi, begitupun sebaliknya jika kecepatan udara yang digunakan rendah maka koefisien daya yang diperoleh pun semakin mengalami penurunan. Adapun terjadinya penurunan nilai koefisien daya seperti yang jelas terlihat pada Gambar 29 disebabkan karena peningkatan daya mekanis yang dikeluarkan oleh turbin angin tidak sebesar dengan peningkatan daya kinetik yang dihasilkan oleh kecepatan aliran udara dari *wind tunnel*, karena pada prinsipnya daya yang dapat dihasilkan oleh turbin angin savonius pada penelitian ini tidak akan lebih besar dari daya kinetik yang dihasilkan oleh angin.

KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan dari penelitian dan analisa dari hasil dan pembahasan maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Turbin model 1 dengan radius sudu kuartal masing-masing 4.3 cm dan 3.1 cm merupakan turbin yang dapat menghasilkan kinerja paling baik dibandingkan dengan turbin model 2 dengan radius sudu kuartal masing-masing 4.5 cm dan 3.5 cm dan turbin model 3 tipe konvensional yang tanpa menggunakan sudu kuartal.
2. Penambahan variasi berupa radius sudu kuartal pada sisi cekung sudu utama pada 2 model turbin angin savonius dari 3 purwarupa yang telah dibuat terbukti dapat meningkatkan nilai koefisien daya serta koefisien torsi yang dihasilkan sebesar 30.34 %.
3. Semakin besar jarak antar sudu kuartal yang ditambahkan pada rotor turbin angin savonius maka semakin baik kinerja yang dihasilkan oleh turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Sanusi and others, 'Experimental Study of Combined Blade Savonius Wind Turbine', *International Journal of Renewable Energy Research*, 6.2 (2016).
- B. F. Blackwell, R. E. Sheldahl, and L. V. Feltz, "Wind Tunnel Performance Data for Two and Three-Bucket Savonius Rotors," Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico, Unlimited Release SAND76-0131, Jul. 1977.
- Burçin Deda Altan and Mehmet Atilgan, 'An Experimental and Numerical Study on the Improvement of the Performance of Savonius Wind Rotor', *Energy Conversion and Management*, 49.12 (2008), 3425–32
<<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.021>>.

- Burçin Deda Altan and Mehmet Atilgan, 'A Study on Increasing the Performance of Savonius Wind Rotors', *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26.5 (2012), 1493–99 <<https://doi.org/10.1007/s12206-012-0313-y>>.
- D. A. Spera, *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, Second Edition. Three Park Avenue, New York, USA: ASME Press, 2009.
- E. Hau, *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Third, Translated edition. Munich: Springer, 2013.
- F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. Sutanto, "An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades," *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 297 – 304, 2015.
- Himran, S., 2005. Energi Angin. Bintang Lamumpatue, Universitas Hasanuddin.
- J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Second Edition. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- J. V. Akwa, J. Gilmar Alves da Silva, and A. P. Petry, "Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics," *Renew. Energy*, vol. 38, pp. 141–149, 2012.
- K. Kacprzak, G. Liskiewicz, and K. Sobczak, "Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines," *Renew. Energy*, vol. 60, pp. 578–585, 2013.
- L. Jae-Hoon, L. Young-Tae, and H.-C. Lim, "Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 231–244, 2016.
- M. Abbaszadeh and F. Doroodian, "A numerical investigation on effects of the gap between plates of Savonius vertical axis wind turbines with different shapes on their performance," *Proc. ASME 2012 Gas Turbine India Conf.*, pp. 259–264, Dec. 2012.
- M. A. Kamoji, S. B. Kedare, and S. V. Prabhu, "Experimental Investigations on Two and Three Stage Modified Savonius Rotor," *Wind Eng.*, vol. Vol. 35, no. No.4, pp. 483–510, 2011.
- O. D. S. Hasan, R. Hantoro, and G. Nugroho, "Studi Eksperimental Vertical Axis Wind Turbine Tipe Savonius dengan Variasi Jumlah Fin pada Sudu," *J. Tek. POMITS*, vol. 2, no. 2, pp. B350–B355, 2013.
- S. J. Savonius, *The Wing Rotor in Theory and Practice*, First Edition. Helsingfors, Finland: Savonius & Co., 1925.
- Sonu Sharma and Rajesh Kumar Sharma, 'Performance Improvement of Savonius Rotor Using Multiple Quarter Blades??? A CFD Investigation', *Energy Conversion and Management*, 127 (2016), 43–54 <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.087>>.
- U. K. Saha, S. Thotla, and D. Maity, "Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 596, pp. 1359– 137, 2008.